

# 限制域、预混气初始温度对多孔介质表面 火焰熄火特性的影响

张 龙, 许全宏, 张 弛, 林培华, 林宇震

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院

航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191)

**摘 要:** 为了对基于多孔介质表面火焰的微型燃烧室技术进行优化设计,以甲烷/空气预混气为研究对象,针对不同的限制域、预混气初始温度,开展了多孔介质表面火焰熄火特性实验研究.实验结果表明:在石英玻璃限制域下,多孔介质表面火焰可以维持在  $0.188\sim 0.436\text{ m/s}$  的低预混气速度下,速度升高容易发生推举和吹熄;而限制域的长度未产生影响作用;随着预混气初始温度从  $293\text{ K}$  升高至  $550\text{ K}$ ,多孔介质表面火焰的熄火速度极限得以提高.当量比为  $1.0$  时,预混气熄火速度从  $293\text{ K}$  的  $1.176\text{ m/s}$  增加至  $550\text{ K}$  的  $2.678\text{ m/s}$ ,并存在不同斜率的上升过程,而初始温度对熄火本质没有影响.

**关 键 词:** 微型燃烧室; 多孔介质; 限制域; 预混气初始温度; 熄火

中图分类号: V23

文献标志码: A

## Effect of restricted domain and premixed gas initial temperature on the flame blow-out performance of surface flame on porous media surface

ZHANG Long, XU Quan-hong, ZHANG Chi, LIN Pei-hua, LIN Yu-zhen  
(National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-thermodynamics,  
School of Energy and Power Engineering,  
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

**Abstract:** To optimize a micro combustor based on porous media dome, the influences of the restricted domain and initial temperature of premixed gas on the blow-out performance of surface flame on porous media surface were investigated experimentally. The premixed gas of methane and air was experimental subject. The results show that with the quartz glass restricted domain, surface flame on porous media surface can only be maintained when the speed of the premixed gas is low ( $0.188\text{--}0.436\text{ m/s}$ ). It is easier to be blown out when the speed of premixed gas is increasing. However, restricted domains with different lengths produce no differences. When the premixed gas initial temperature increases from  $293\text{ K}$  to  $550\text{ K}$ , the blow-out velocity of surface flame on porous media surface becomes higher. When the equivalence ratio equals  $1.0$ , the blow-out velocity of initial premixed gas increased from  $1.176\text{ m/s}$  ( $293\text{ K}$ ) to  $2.678\text{ m/s}$  ( $550\text{ K}$ ). There are two rising processes with different slopes. In this condition, initial temperature of premixed gas doesn't yield essentially impact on the blow-out performance.

**Key words:** micro combustor; porous media; restricted domain;  
initial temperature of premixed gas; blow-out

近年来,随着便携式装置、微型传感器的快速发展,对小尺寸电源、高能量密度的供能系统的需求日益增加.相比受天气条件影响的太阳能以及功率密度低的锂电池产品,基于燃料燃烧的微动力系统具有高功率密度和高能量密度的特点,可以稳定、连续地提供动力.装有微型发动机的微型飞行器在军事和民用方面都有极其广阔的应用前景<sup>[1-2]</sup>.

微型燃烧室的特征尺寸一般为几毫米到几十毫米,燃烧室的表面积体积比增大,燃料的停留时间缩短,壁面热损失急剧增大,如何保证燃料的燃烧效率以及如何避免热损失过大而导致的不稳定燃烧是开发和设计微型燃烧室不得不考虑的难点问题<sup>[1,3-5]</sup>.MIT最早对微型动力装置进行研究,包括用于喷气式发动机和涡轮发动机的微型燃烧室的设计和实验,以碳化硅材料和增加回热通道减小热损失<sup>[6-8]</sup>.Kim等<sup>[9]</sup>对3种不同结构的Swiss-roll燃烧器进行燃烧性能和排放实验,发现随着热损失的增加,可燃边界变窄,燃气中一氧化碳含量较高.对于微尺度燃烧,国内学者做了很多基础研究.王国锋、钟北京等对微细通道内甲烷/氧气预混气火焰进行了实验研究,确定火焰在细管中稳定传播的当量比极限、传播速度,并发现考虑散热损失情况下,微细直管与外界的换热量占总燃烧放热的40%左右<sup>[10-11]</sup>.张永生<sup>[12]</sup>进行了T型微细管道内的氢气/空气预混气燃烧实验,发现T型管内存在回流区,能够实现稳定燃烧.

解决微型燃烧室不稳定燃烧的另一个途径是采用多孔介质燃烧技术.多孔介质孔隙尺寸微小,比表面积数值大,蓄热能力强.相应的燃烧技术具有稳定性好、负荷调节比大、燃烧极限宽等优点<sup>[13-14]</sup>.Konnov等<sup>[15]</sup>对多孔介质表面火焰二维效应的影响进行了数值模拟和实验研究,发现80%燃烧室直径范围内可认为火焰为一维,多孔介质出口流场的不均匀以及预混气的扩散作用是导致低压下火焰传播速度降低的主要原因.Kim等<sup>[16]</sup>研究了多孔介质表面物理化学特性对熄火特性的影响,发现表面处理对惰性材料未产生影响,熄火距离随表面温度分为3个不同的区域.国内冯耀勋、王勇等<sup>[17-18]</sup>对多孔介质表面火焰的稳定速度、不同材料多孔板壁温进行了实验研究,发现随当量比的增大,形成平面火焰的速度极限范围越大,选择导热系数较低的材料作为多孔壁面,可以降低壁面温度.

为了进一步了解多孔介质表面的预混火焰特

性,为微型燃烧室稳火结构的设计提供实验依据和参数范围,本文通过石英玻璃限制域模拟微型燃烧室火焰筒壁面,并就限制域、预混气初始温度对多孔介质表面火焰熄火特性的影响进行实验研究.以甲烷/空气预混气作为研究对象,重点考察熄火过程火焰形态的变化以及限制域、预混气初始温度对熄火特性的影响.

## 1 实验方法及系统

多孔介质表面火焰(以下简称表面火焰)熄火特性实验系统如图1所示,空气和甲烷经减压阀,通过气体混合罐混合均匀后进入实验段,在多孔介质表面点火燃烧,再逐渐升高预混气速度直至吹熄.实验过程中空气和甲烷的流量采用CS200A型质量流量控制器控制,精度为 $\pm 0.35\%$ ,其中甲烷、空气和预混气的流量计量程分别为标准状态下5,50,20 L/min.实验段下部采用电加热套对预混气加热,预混气初始温度采用K型热电偶在收缩段前进行测量.流量数据和温度数据采用ADAM4019型多通道数据采集模块进行采集.熄火过程采用CCD(charge coupled device)相机和FASTCAM SA4型高速摄像机进行记录.

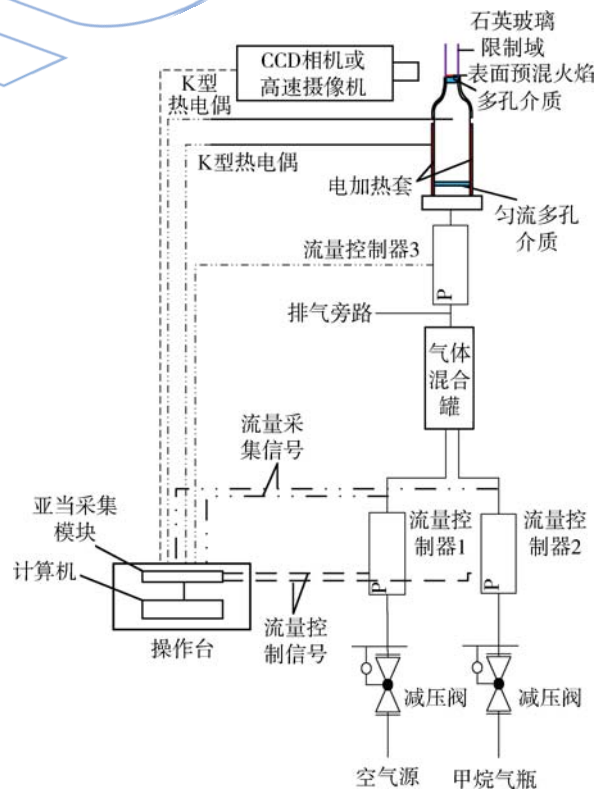


图1 表面火焰熄火特性实验系统

Fig. 1 Test rig of flame blow-out performance of surface flame

研究限制域对熄火特性的影响时,将石英玻璃限制域套在多孔介质套管外,用高温胶加以固定,石英玻璃管内径为 9 mm,外径为 11 mm,长度分别为 2~20 mm 不等. 研究预混气初始温度对熄火特性的影响时,根据 K 型热电偶测量的温度值,调节电加热套功率,使预混气初始温度分别达到 300, 350, 400, 450, 500, 550 K.

实验中作为表面火焰载体的不锈钢烧结金属多孔介质外径和厚度分别为 8 mm 和 5 mm,参见国标“可渗透性烧结金属材料—气泡试验孔径的测定”和“可渗透性烧结金属材料—流体渗透性的测定”的规定,实验前测定多孔介质的当量孔径为  $80\ \mu\text{m}$ ,孔隙率为 0.55.

实验时,流量控制器 1、流量控制器 2 分别控制甲烷和空气的流量,为保证在预混气当量比不变的情况下,调节预混气流量,设计流量控制器 3 和旁路. 当预混气速度为  $0.2\ \text{m/s}$  时,在多孔介质上方 1 mm 处点火,形成稳定的表面火焰,再逐渐增大预混气速度,直至熄火发生. 高速摄像机同采集模块共用一个时钟,准确记录熄火时间,结合流量数据获得熄火速度值. 实验段简图和实物如图 2 所示.

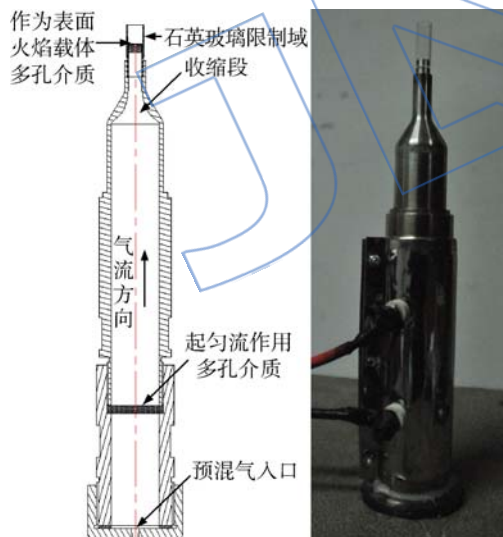


图 2 实验段简图和实物图

Fig. 2 Schematic and physical diagrams of test section

## 2 实验结果及分析

由于本文的研究对象为多孔介质表面火焰,增加限制域后,火焰极易脱离多孔介质表面在限制域出口燃烧,转变成单纯的预混气燃烧,因此针对限制域条件的研究以火焰脱离多孔介质表面作为熄火的判断依据.

### 2.1 限制域对熄火特性的影响

采用 CCD 相机获得的相同石英玻璃长度(2 mm)、不同当量比( $\Phi=0.7\sim 1.2$ )以及不同石英玻璃长度(2~20 mm)、相同当量比( $\Phi=1.0$ )的火焰形态分别如图 3、图 4 所示. 其中,预混气初始温度均为 293 K,速度均为  $0.2\ \text{m/s}$ . 在进行限制域长度对火焰形态影响的实验时,对 10 种 2~20 mm 的不同长度限制域进行了实验,实验结果显示火焰形态基本没有变化,因此在此仅列出两种边界情况(2, 20 mm)进行说明.

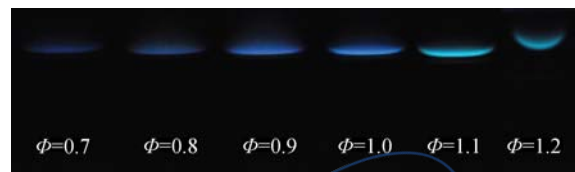


图 3 相同长度限制域表面火焰( $\Phi=0.7\sim 1.2$ )

Fig. 3 Surface flame with the same restricted domain length ( $\Phi=0.7\sim 1.2$ )

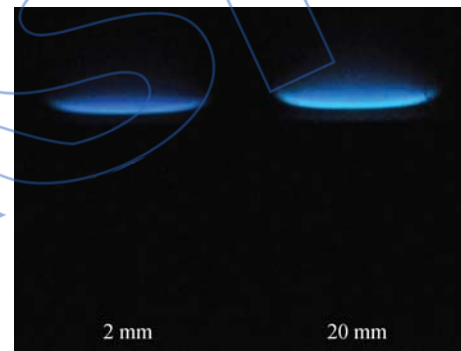


图 4 不同长度限制域表面火焰( $\Phi=1.0$ )

Fig. 4 Surface flame with different restricted domain lengths ( $\Phi=1.0$ )

对于有/无限制域和不同当量比条件,在相同初始温度(293 K),能够维持多孔介质表面火焰的最大预混气速度如图 5 所示.

安置限制域后,表面火焰可以维持在较低的预混气速度下,但相比未安置的情况更容易发生火焰推举和吹熄. 高当量比条件下( $\Phi>1.2$ )火焰边缘向上弯曲,三维效应显著,无法形成表面火焰. 不同当量比下维持表面火焰的预混气速度先上升后下降,从  $0.188\ \text{m/s}$  ( $\Phi=0.6$ ) 升高至  $0.436\ \text{m/s}$  ( $\Phi=1.0$ ),再下降为  $0.205\ \text{m/s}$  ( $\Phi=1.2$ ). 不同长度的限制域并未对火焰形态产生影响.

安置限制域后受固体壁面影响,附面层厚度从多孔介质出口处逐渐增加,直至充分发展,主流区范围变窄. 根据火焰稳定机制,增加限制域后,

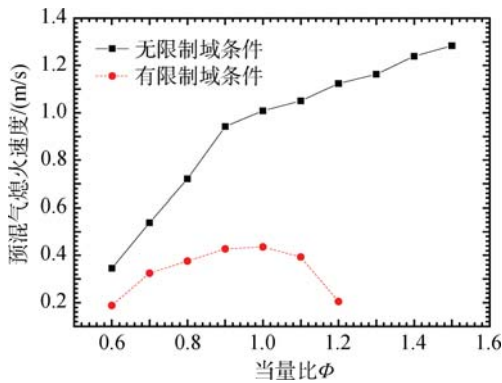


图 5 有/无限制域,表面火焰预混气熄火速度  
Fig. 5 Blow-out speed of premixed gas with/without restricted domain

表面火焰更容易向边界层较厚的限制域出口移动,而表面火焰同多孔介质表面的热量传递则使表面火焰有稳定在多孔介质表面的趋势.因此,表面火焰稳定的位置受两者共同影响,表面火焰的稳定性相比无限制域时较差.

### 2.2 预混气初始温度对熄火特性的影响

预混气初始温度的变化没有对熄火过程的火焰形态变化产生影响,初始温度为 293 K,高速摄像机拍摄的熄火过程图片经筛选整理后如图 6 所示.

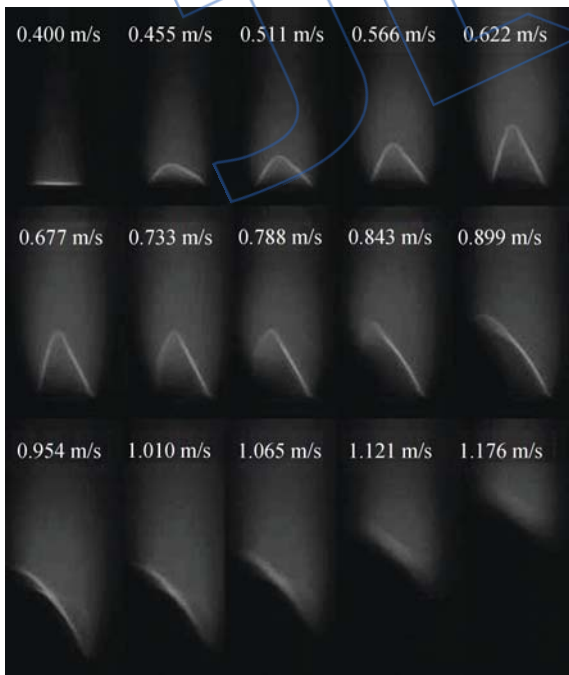


图 6 熄火过程高速摄像机图片  
Fig. 6 Blow-out process photographed by high-speed camera

熄火过程中,随着预混气速度的增加,多孔介质表面火焰从平面火焰逐渐过渡为本生灯火焰,表面火焰高度进一步增加直至发生吹熄.高速摄像机捕捉到的熄火过程先从表面火焰的一侧发生,继而扩展为整个表面火焰的熄火,这由多孔介质出口流场在边缘的不对称性所导致,边界层较薄的一侧速度梯度大,表面火焰稳定能力弱,首先发生脱火.由于实验中使用的烧结金属丝网多孔介质是通过不锈钢金属网叠加压制并在高温炉种烧结制成,多孔介质本身边缘的孔隙率和孔隙分布存在差异,无法在实验中消除这一变量.针对这问题,作者会在接下来的实验中换用其他种类的多孔介质或者运用热线等测速设备针对多孔介质出口速度场对火焰形态的影响进行研究.

实验测得预混气初始温度( $T$ )从 293 K 变化至 550 K 的熄火速度如图 7 所示.

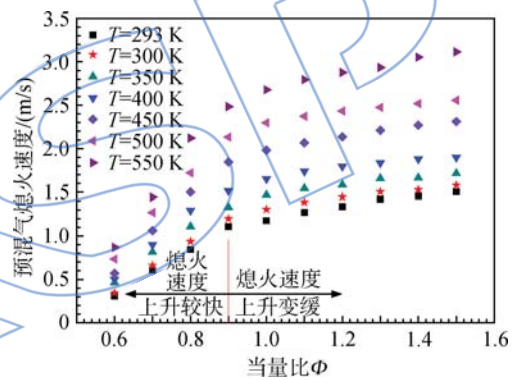


图 7 多孔介质在不同温度下的熄火速度  
Fig. 7 Blow-out speed of the porous media at different temperatures

随着预混气初始温度增高,多孔介质的熄火速度逐渐得到提升, $\Phi=1.0$  时,预混气熄火速度从 293 K 的 1.176 m/s 增加至 550 K 的 2.678 m/s.这是由于预混气初始温度的增高,使得多孔介质表面火焰的传播速度增大,稳定性增强,只有在更高的预混气速度下才会发生熄火.在不同的当量比下,熄火速度存在两个斜率不同的上升过程.在  $\Phi < 0.9$  时,熄火速度的上升速度较快;在  $\Phi > 0.9$  时,上升的速率相对变缓.不同温度下的熄火速度曲线趋势相同,预混气初始温度的增高没有使熄火速度曲线产生明显的变化,温度的改变并没有对熄火的本质产生影响.

### 3 结论与展望

本文针对有/无限制域条件以及不同预混气初始温度对多孔介质表面火焰熄火特性的影响进

行了实验研究,得到以下主要结论:

1) 安置限制域后,表面火焰可以维持在  $0.188\sim 0.436\text{ m/s}$  的较低预混气速度下,但相比未安置的情况更容易发生火焰推举和吹熄,限制域长度对火焰形态不会产生影响。

2) 高当量比条件 ( $\Phi > 1.2$ ) 火焰边缘向上弯曲,无法形成表面火焰。不同当量比下维持表面火焰的最大预混气速度先上升后下降,在  $\Phi = 1.0$  时达到最大值  $0.436\text{ m/s}$ 。

3) 随着预混气初始温度增高,多孔介质熄火速度逐渐提高。在不同的当量比下,熄火速度存在不同斜率的上升过程。

4) 预混气初始温度的升高并没有对熄火速度曲线的趋势产生明显影响,温度的变化并没有改变多孔介质表面火焰熄火的本质。

为了进一步分析多孔介质表面火焰的熄火机制,下一步需要结合数值模拟开展研究。同时,为了拓宽微型燃烧室的燃料灵活性,将对不同的单组份和多组分碳氢燃料,如乙炔、正癸烷、异辛烷以及航空煤油 RP-3 等进行实验研究。

## 参考文献:

- [1] JU Yiguang, Maruta K. Microscale combustion: technology development and fundamental research[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2011, 37(1): 669-715.
- [2] Peirs J, Reynaerts D, Verplaetsen F A. Microturbine for electric power generation[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2004, 113(1): 86-93.
- [3] Waitz I A, Gauba G, Tzeng Y. Combustors for micro gas turbine engines[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1998, 120(3): 109-117.
- [4] 李占科, 宋笔锋, 宋海龙. 微型飞行器的研究现状及其关键技术[J]. *飞行力学*, 2003, 21(4): 1-4.  
LI Zhanke, SONG Bifeng, SONG Hailong. Study on actualities of micro air vehicles and its key technologies[J]. *Flight Dynamics*, 2003, 21(4): 1-4. (in Chinese)
- [5] 蒋利桥, 赵黛青, 汪小愁, 等. 新型低热损失微燃烧器原型的实验研究[J]. *热能动力工程*, 2008, 23(1): 88-91.  
JIANG Liqiao, ZHAO Daiqing, WANG Xiaohan, et al. Experimental study of a novel miniature-burner prototype with a low heat loss[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2008, 23(1): 88-91. (in Chinese)
- [6] London A P, Epstein A H, et al. Microfabrication of a high pressure bipropellant rocket engine[J]. *Sensor and Actuators*, 2001, 92(1): 351-357.
- [7] Mehra A, Waitz I A, Schmidt M A. Combustion tests in the static structure of a 6-wafer micro gas turbine engine[R]. 1999 Solid State Sensor and Actuator Workshop Transducers Conference, 1999.
- [8] Spadaccini C M, Lee J. High power density silicon combustion system for micro gas turbine engines[J]. *ASME Paper GT-2002-30082*, 2002.
- [9] Kim N I, Kato S, Katapla T, et al. Flame stabilization and emission of small Swiss-roll combustors as heaters[J]. *Combustion and Flame*, 2005, 141(3): 229-240.
- [10] 王国锋, 钟北京. 微细通道中甲烷与氧气的预混燃烧[J]. *燃烧科学与技术*, 2006, 12(2): 97-100.  
WANG Guofeng, ZHONG Beijing. Methane-oxygen premixed combustion in micro-scale tube[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2006, 12(2): 97-100. (in Chinese)
- [11] 李军伟, 钟北京. 微细直管燃烧器的散热损失研究[J]. *中国电机工程学报*, 2007, 27(20): 59-64.  
LI Junwei, ZHONG Beijing. Investigation on heat loss of microtube combustor[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(20): 59-64. (in Chinese)
- [12] 张永生. 微尺度燃烧及其热电转化基础研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.  
ZHANG Yongsheng. Mechanism study on micro-combustion and thermoelectric transformation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. (in Chinese)
- [13] 黄志峰. 在管内核心区插入多孔介质实现强化传热的实验与数值研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.  
HUANG Zhifeng. Experimental and numerical studies of enhancing heat transfer in a tube by inserting porous media at the core[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [14] 王恩宇, 程乐鸣, 骆仲决, 等. 多孔介质中预混火焰猝熄及自稳定性研究[J]. *热科学与技术*, 2005, 4(1): 58-62.  
WANG Enyu, CHENG Leming, LUO Zhongyang, et al. Quenching and self-stability of premixed flame in porous media[J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2005, 4(1): 58-62. (in Chinese)
- [15] Konnov A A, Riemeijer R, Kornilov V N, et al. 2D effects in laminar premixed flames stabilized on a flat flame burner[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2013, 47(1): 1-11.
- [16] Kim K T, Lee D H, Kwon S. Effects of thermal and chemical surface-flame interaction on flame quenching[J]. *Combustion and Flame*, 2006, 146(1): 19-28.
- [17] 冯耀勋, 王勇, 蒋利桥, 等. 预混气温度及多孔材料特性对多孔介质表面火焰的影响[J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(32): 46-52.  
FENG Yaoxun, WANG Yong, JIANG Liqiao, et al. Effect of temperature of premixed gas and porous wall characteristic on the flames on porous wall surface[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(32): 46-52. (in Chinese)
- [18] 王勇, 蒋利桥, 赵黛青, 等. 多孔介质表面火焰的燃烧特性[J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(29): 67-71.  
WANG Yong, JIANG Liqiao, ZHAO Daiqing, et al. Combustion characteristics of flames on porous wall surface[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(29): 67-71. (in Chinese)